

Ю.К. Новоселов, д-р техн. наук, В.Б. Богущкий, Севастополь, Украина

## АНАЛИЗ СВЯЗИ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА С ИЗНОСОМ АБРАЗИВНЫХ ЗЕРЕН

*Наведено аналіз динаміки зносу одиничних абразивних зерен в зоні контакту на прикладі круглого зовнішнього шліфування.*

*Приведен анализ динамики износа единичных абразивных зерен в зоне контакта на примере круглого наружного шлифования.*

*An analysis of the dynamics of individual abrasive grains wear in the contact area on the example of a circular external grinding.*

Введение. Механизм износа единичных абразивных зерен и явления, возникающие при контакте зерна с материалом, наиболее детально изучены в работах Т.Н. Лолодзе, Г.В. Бокучавы, Н.И. Богомолова и ряда других исследователей [1,2,3]. Однако кинетика процесса износа единичных абразивных зерен в большинстве работ не рассматривалась, что не позволяет прогнозировать работу единичного зерна и, как следствие, прогнозировать работоспособность шлифовального круга. Для описания работы абразивных зерен весьма перспективным является использование динамических теоретико-вероятностных моделей процесса шлифования.

Цель работы: изучить связь закономерностей износа абразивных зерен с износом шлифовального круга для условий круглого шлифования.

Износ абразивного зерна происходит в зоне контакта, которая возникает при сближении инструмента и заготовки. Зона контакта при круглом шлифовании представляет собой, в геометрическом изображении, форму двух сегментов (рисунок 1, а), однако, действительная форма зоны контакта отличается от её геометрического изображения в связи с тем, что в результате контакта абразивных зерен с материалом обрабатываемой детали её радиус уменьшается на величину радиального съема  $\Delta r$ , радиус шлифовального круга – на величину его радиального износа  $\Delta R$ , а на поверхности остается слой шероховатости. Упругие и температурные деформации элементов технологической системы изменяют глубину микрорезания, под действием сил возникающих при микрорезании абразивные зерна утапливаются в связку инструмента и линия, ограничивающая зону контакта со стороны материала, будет смещаться к центру вращения круга.

Абразивные зерна на рабочей поверхности круга расположены на различной глубине  $u_i$  от условной наружной поверхности инструмента и их работа зависит от длины траекторий движения в зоне контакта и условий кон-

такта с обрабатываемым материалом. До входа в зону обрабатываемая поверхность имеет определенный микрорельеф, образовавшийся на предыдущей операции или при выполняемом процессе шлифования. Единичное зерно при шлифовании, проходя зону контакта, может срезать материал, если попадает на один из выступов шероховатости поверхности, или не срезать его, если попадет в одну из впадин шероховатости. При встрече зерна с выступом увеличивается доля удаленной части материала, а если зерно попадает во впадину – материал не снимается, но вероятность контакта увеличивается. В каждой точке зоны контакта условия контакта абразивного зерна с материалом отличаются.

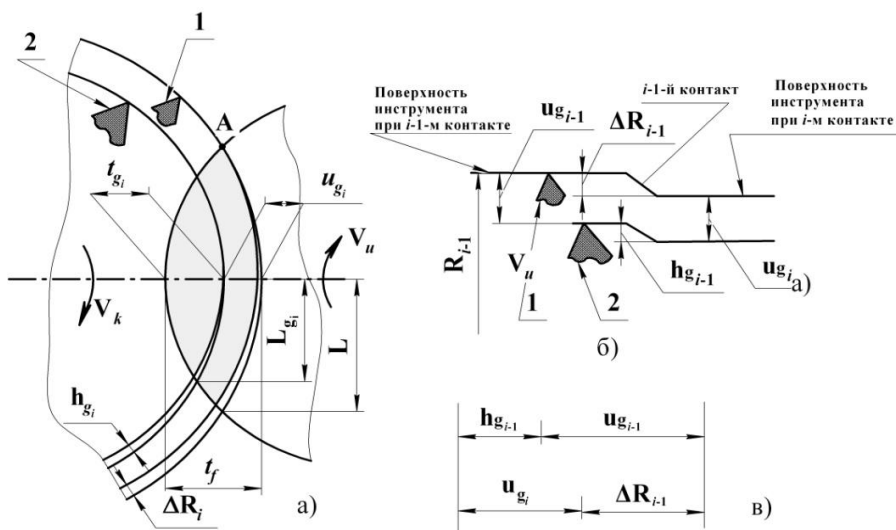


Рисунок 1 – Схема к расчету пути резания единичного абразивного зерна

Активная работа зерна проявляется после того, как оно начнет проходить через зону контакта. Глубина резания  $t_{g_i}$  единичным абразивным зерном, которое расположено на расстоянии  $u_{g_i}$  от условной наружной поверхности инструмента (рисунок 1, а), в основной плоскости, проходящей через центр детали и центр шлифовального круга, для любого  $i$ -го контакта инструмента с заготовкой равна

$$t_{g_i} = t_{f_i} - u_{g_i} \quad (1)$$

где  $t_{fi}$  – максимально возможная (номинальная) глубина микрорезания абразивными зернами в плоскости, проходящей через оси вращения круга и заготовки (основная плоскость).

При движении в зоне контакта, глубина микрорезания  $t_{gi}(z)$  определяется из соотношения [5]

$$t_{gi}(z) = t_{gi} - z^2 / D_3. \quad (2)$$

где  $D_3$  – эквивалентный диаметр  $D_3 = \frac{D_{kp} \cdot d_o}{D_{kp} + d_o}$ ,  $D_{kp}$  – диаметр шлифовального круга,  $d_o$  – диаметр детали.

Контактируя с деталью, зерно пересекает разные уровни её поверхности  $y_j$  и в зависимости от ее состояния, соотношение удаленного и не удаленного материала различно. При движении в зоне контакта величина  $y_j$  увеличивается от 0 до  $t_{gi}$  и затем снижается до 0 (рисунок 2), соответственно различна и вероятность контакта вершины зерна с обрабатываемым материалом  $P_k$ .

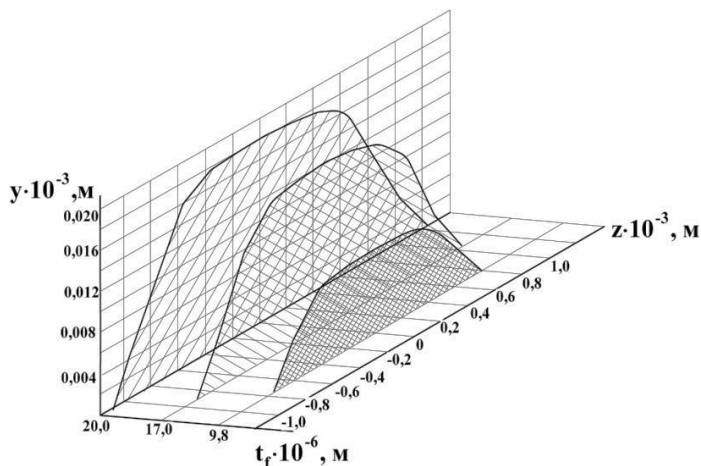


Рисунок 2 – Изменение величины  $y_j$  при движении абразивного зерна в зоне контакта ( $u = \text{const}$ ).

Для определения величины  $y$  рассмотрим  $j$ -й контакт обрабатываемой поверхности и инструмента (рисунок 3). Расстояние от верхней границы слоя шероховатости до фиксированного уровня при выполнении  $j$ -го контакта равно  $y_j$ , при выполнении  $j-1$ -го контакта –  $y_{j-1}$ , при выполнении  $j-2$ -го –

$y_{j-2}$ , при выполнении  $j-i$ -го -  $y_{j-i}$ . Вследствие наличия микрорезания, после выхода из зоны контакта, радиус заготовки уменьшается на величину радиального съема материала  $\Delta r$ . Тогда согласно схеме на рисунке 3: для  $j-1$ -го контакта -  $y_{j-1} = y_j + \Delta r_{j-1}$ ; для  $j-2$ -го -  $y_{j-2} = y_j + \Delta r_{j-1} + \Delta r_{j-2}$ ; для  $j-3$ -го -  $y_{j-3} = y_j + \Delta r_{j-1} + \Delta r_{j-2} + \Delta r_{j-3}$ ; для  $j-i-1$ -го контакта -

$$y_{j-i-1} = y_j + \sum_{k=j-1}^j \Delta r_k.$$

Обрабатываемый материал на уровне  $y_j$  будет удаляться только при тех контактах, для которых глубина микрорезания больше расстояния до уровня  $y_{j-i}$ , т.е. соблюдается условие:  $t_{f-j} \geq y_{j-i}$ .

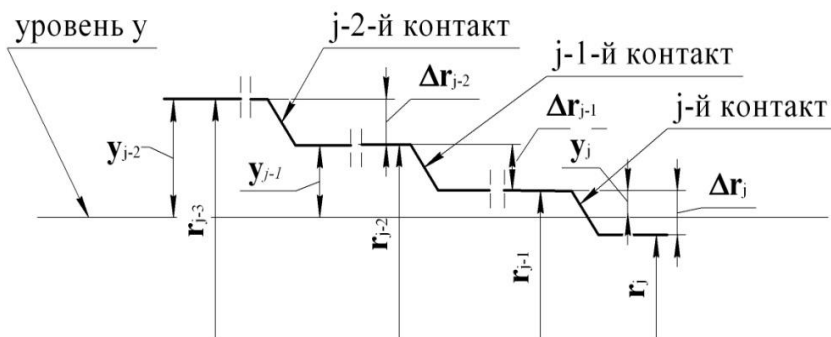


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения величины  $y$ .

Проанализируем работу двух абразивных зерен при  $i-1$ -м контакте круга с заготовкой, вершина первого из них находится на условной рабочей поверхности инструмента, а вершина второго расположена на расстоянии  $u_{gi}$  по глубине инструмента (рисунок 1, а). Вполне очевидно, что при одном контакте износ первого зерна  $h_{g1}$  будет больше износа второго  $h_{g2}$ , так как длина его траектории движения  $2L_{g1}$  и глубина микрорезания  $t_{g1}$  в зоне контакта больше. Кроме того, вероятность контакта его вершины с материалом так же больше.

На рисунке 1, б показана развертка условной наружной поверхности инструмента. Условная наружная поверхность инструмента до  $i-1$ -го контакта описывается радиусом  $R_{i-1}$  и, соответственно, расстояние между первым и вторым зернами равно  $u_{gi-1}$ . После  $i-1$ -го контакта, с учетом радиального износа инструмента  $\Delta R_{i-1}$ , условная наружная поверхность описывается ра-

диусом  $R_i$ . Расстояние между первым и вторым зернами уменьшилось и теперь равно  $u_{g_i}$ . Согласно рисунку 1, б можно построить размерную цепь, показанную на рисунке 1, в.

Для  $i$ -го контакта, как следует из размерной цепи (рисунок 1, в)

$$u_{g_i} = u_{g_{i-1}} + h_{g_{i-1}} - \Delta R_{i-1} \quad (3)$$

где  $u_{g_{i-1}}$  и  $u_{g_i}$  – координаты вершины зерна до  $i-1$ -го и  $i$ -го контактов;  $\Delta R_{i-1}$  и  $h_{g_{i-1}}$  – радиальный износ круга и износ вершины зерна при выполнении  $i-1$ -го (до начала  $i$ -го) контакта.

Подставим значение  $u_{g_i}$  из уравнения (3) в уравнение (1).

$$t_{g_i} = t_{f_i} - u_{g_i} = t_{f_i} - u_{g_{i-1}} - h_{g_{i-1}} + \Delta R_{i-1} \quad (4)$$

Глубину микрорезания  $t_{f_i}$  при  $i$ -м контакте можно определить как

$$t_{f_i} = t_{f_{i-1}} + \Delta t_{f_i} \quad (5)$$

где  $\Delta t_{f_i}$  – изменение глубины микрорезания при  $i$ -м контакте.

Согласно уравнения (1)

$$t_{f_{i-1}} = t_{g_{i-1}} + u_{g_{i-1}} \quad (6)$$

Тогда уравнение (5) можно записать в виде

$$t_{f_i} = t_{g_{i-1}} + u_{g_{i-1}} + \Delta t_{f_i} \quad (7)$$

Перепишем уравнение (4) с учетом значения  $t_{f_i}$ , полученного в уравнении (7)

$$t_{g_i} = t_{g_{i-1}} + \Delta t_{f_i} - h_{g_{i-1}} + \Delta R_{i-1} \quad (8)$$

Разностное уравнение (8) устанавливает связь износа абразивного инструмента  $\Delta R_{i-1}$  с износом единичных абразивных зерен  $h_{g_{i-1}}$  при различных режимах обработки (параметры  $t_{g_{i-1}}$  и  $\Delta t_{f_i}$ ).

В стадии установившегося износа обычно принимается, что размерный износ инструмента пропорционален величине относительного износа  $h_0$  и пути резания  $L_{pez}$ . Величина относительного износа  $h_0$  зависит от марок инструментального материала и обрабатываемой детали и по данным [1, 4] пропорциональна глубине микрорезания  $h_{g_0} = K_h t_{g_i}$ , где  $K_h$  – коэффициент пропорциональности, соответственно, для размерного износа единичного абразивного зерна можно записать

$$h_{g_i} = h_{g_0} L_{pez} = K_h t_{g_i} L_{pez}. \quad (9)$$

Длина пути резания единичным абразивным зерном  $L_{рез}$  не равна длине траектории движения. Так, абразивное зерно, наиболее удаленное от центра вращения круга, может контактировать с материалом либо в точке А, либо значительно ближе к линии центров. Для абразивных зерен, находящихся ближе к центру вращения круга, контакт с материалом при  $i$ -м обороте круга вообще может не наблюдаться, если абразивное зерно попадет во впадину микронеровностей. Действительное значение  $L_{рез}$  может быть установлено только на основе анализа вероятности контакта вершин зерен с материалом.

Вероятность контакта вершины абразивного зерна с материалом  $P_k$  в любой точке зоны контакта определяется вероятностью неудаления материала  $P(\overline{M})$  [4]

$$P_k = 1 - P(M) = P(\overline{M}),$$

где  $P(M)$  – вероятность удаления материала.

Суммарная длина пути резания зависит от длины траектории движения абразивных зерен в зоне контакта и вероятности контакта и на  $i$ -м обороте круга определяется по уравнению

$$L_{рез} = \int_{-L_{gi}}^{L_{gi}} P_k dz, \quad (10)$$

а зависимость для расчета износа абразивного зерна будет иметь вид

$$h_{gi} = \int_{-L_{gi}}^{L_{gi}} K_h t_{gi} P(\overline{M}) dz, \quad (11)$$

где  $L_{gi}$  – расстояние от основной плоскости до точек входа в зону и выхода из зоны абразивного зерна при  $i$ -м контакте круга с деталью, определяется

$$\text{как } L_{gi} = \sqrt{t_{gi} D_3}.$$

Как показано в работе [4], вероятность неудаления материала на уровне  $y$  (рис.1, в) рассчитывается по зависимости

$$P(\overline{M}) = e^{-a_0 - a_1 - a_2 - \dots - a_{j-1} - a_j(y)}, \quad (12)$$

где  $j$  – номер контакта рассматриваемого участка поверхности детали с абразивным зерном,  $a_0$  – показатель, определяющий исходное состояние поверхности,  $a_1, a_2, \dots, a_{j-1}, a_j(y)$  – показатели, характеризующие изменение вероятности удаления материала после первого, второго и т.д. контактов с рассматриваемого участка поверхности детали с кругом.

При принятых значениях  $m = 0,5$  и  $\chi = 1,5$  ( $m$  – показатель степенной зависимости при расчете ширины профиля вершины зерна,  $\chi$  – показатель степенной зависимости при расчете распределения режущих кромок активных зерен по глубине рабочей поверхности инструмента [6]) вероятность контакта абразивных зерен с обрабатываемым материалом определяется по зависимости [7]

$$P_k = P(\bar{M}) = \exp \left\{ - \frac{\pi K_c \sqrt{2\rho_g} (V_k \pm V_u) n_g}{V_u H_u^{3/2}} \times \left[ \frac{2}{5} \sqrt{D_s} \sum_{i=2}^n (t_f - y_j - i\Delta r)^{5/2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{3}{8} (t_f - y_j - \Delta r)^2 \left( z - \frac{2z^3}{3L_{y_j}^2} + \frac{z^5}{5L_{y_j}^4} + \frac{8}{15} L_{y_j} \right) \right] \right\} \quad (13)$$

где  $K_c$  – коэффициент стружкообразования, который учитывает, что не весь материал удаляется из объема риски, а часть его вытесняется и образует по краям риски навалы;  $V_k$  – скорость круга;  $V_u$  – скорость детали;  $n_g$  – количество вершин зерен на единицу поверхности рабочего слоя круга;  $\rho_g$  – радиус округления при вершине зерна;  $H_u$  – величина слоя рабочей поверхности круга по глубине, в пределах которого подсчитывается число абразивных зерен;  $L_{y_j}$  – расстояние от основной плоскости до пересечения уровня  $y_j$  с условной наружной поверхностью инструмента,  $L_{y_i} = \sqrt{(t_f - y_j) D_s}$ .

Обрабатываемый материал на уровне  $y_j$  будет удаляться только при выполнении тех касаний, для которых глубина микрорезания больше расстояния до уровня  $y_{j-i-1}$ , т.е. соблюдается условие  $t_{fj-i} \geq y_{j-i-1}$ . Если  $t_{fj-i} < y_{j-i-1}$ , то материал на наблюдаемом уровне не удаляется и слагаемое

$$\sum_{i=2}^n (t_f - y_j - i\Delta r)^{5/2}$$

при вычислениях уравнения (13) приравняется к нулю.

На рисунке 4 приведены результаты расчетов вероятности контакта абразивных зерен с обрабатываемым материалом образцов из закаленной стали диаметром 50 мм кругами из электрокорунда белого зернистостью 25 при скорости круга  $V_k = 35 \text{ м/с}$ , скорости детали  $V_u = 0,2 \text{ м/с}$ .

Анализ вероятности контакта вершины абразивного зерна с материалом показывает, что для наиболее удаленного от центра круга зерна при движении от точки входа в зону к основной плоскости, проходящей через центр

детали и центр шлифовального круга, наблюдается увеличение вероятности контакта. В основной плоскости она становится равной единице. При движении от основной плоскости к точке выхода вероятность снижается от единицы до нуля. Для зерен, расположенных на расстоянии  $u_g$  от условной наружной поверхности инструмента, кривые имеют более плавный характер, у них нет столь выраженного линейного участка в области основной плоскости, при всех значениях  $z$  вероятность меньше единицы. Все кривые расположены внутри кривой  $u_g = 0$  и имеют меньшую протяженность, максимум всех кривых смещен в сторону отрицательных значений  $z$  и уменьшается по величине с увеличением  $u_{gi}$ .

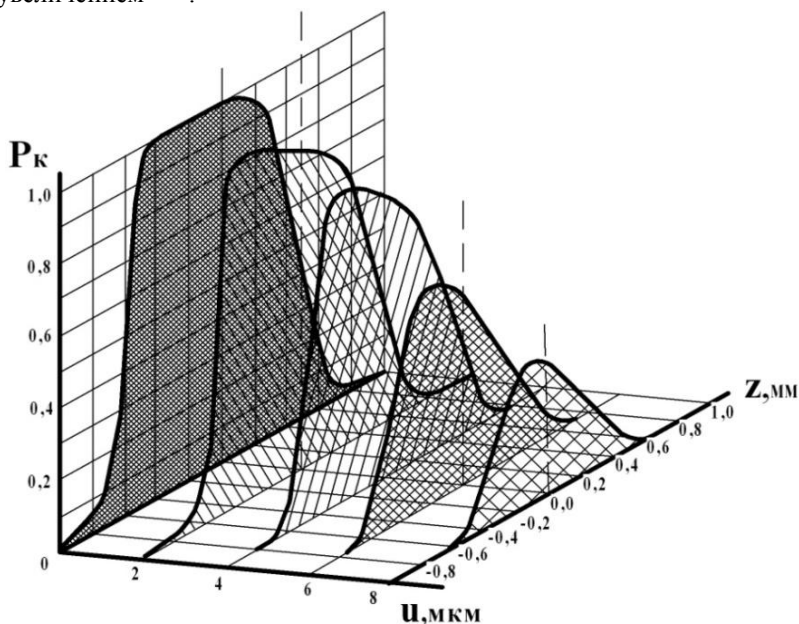


Рисунок 4 – Вероятность контакта вершины зерна с обрабатываемым материалом

Численное решение интеграла (10) и разностного уравнения (8) по методу Симпсона получено на ПК для случая шлифования образцов из закаленной стали диаметром 50 мм кругами 1-300x20x127 24А 25-Н СМ2 Б. Скорость круга при расчетах была принята равной 35 м/с, скорость детали – 0,2 м/с. Результаты расчетов приведены на рисунках 5 и 6.



длина пути резания, с увеличением числа контактов поверхности инструмента с обрабатываемой деталью увеличивается. Кривые отображают динамику работы зерна в круге, начиная с момента его активизации. При первых 100...200 касаниях вероятность контакта абразивного зерна с металлом и длина пути резания практически равны нулю, вершина зерна не изнашивается, глубина микрорезания увеличивается почти пропорционально  $i = v_k \tau$ . С увеличением глубины микрорезания абразивное зерно все дальше проникает в зону резания, увеличивается вероятность его контакта с обрабатываемым материалом и длина пути резания. Вершина зерна начинает более интенсивно изнашиваться, её продвижение по глубине замедляется. При дальнейшем увеличении времени работы инструмента размерный износ вершины зерна на  $i - m$  касании все более приближается к величине радиального износа круга, а приращение глубины микрорезания стремится к нулю. Цикл активной работы зерна заканчивается при его разрушении под действием сил и температур, возникающих при микрорезании.

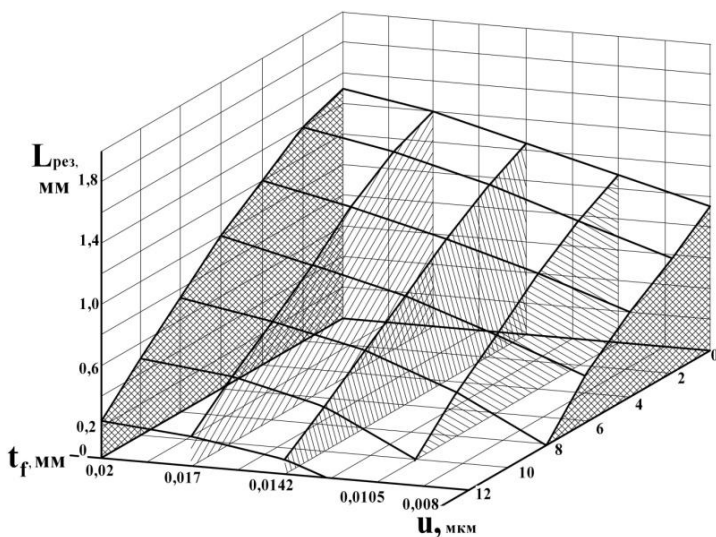


Рисунок 5 – Длина пути резания единичным абразивным зерном

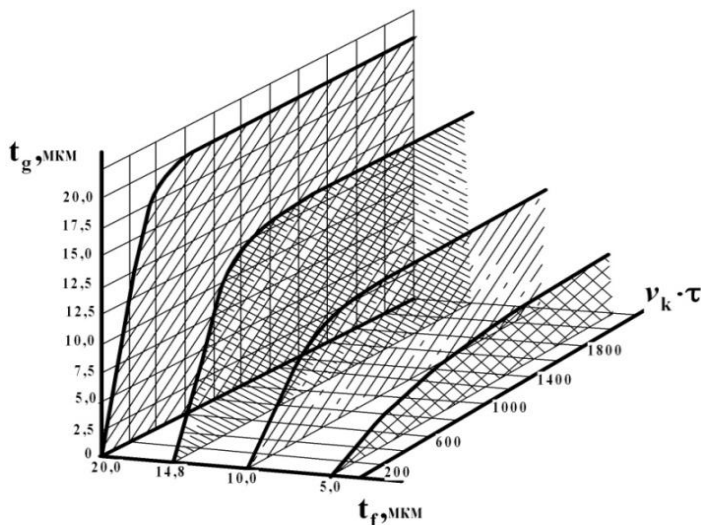


Рисунок 6 – Влияние числа контактов круга с деталью на глубину микрорезания абразивным зерном при шлифовании закаленной стали

**Выводы.** Полученные зависимости описывают динамику износа единичных абразивных зерен в условиях работы инструмента в режиме затупления. Износ зерен непрерывно увеличивается, затупившиеся вершины перестают резать, что приводит к снижению производительности процесса. для дальнейшего развития необходимо обеспечить самозатачиваемость шлифовального круга, что является задачей дальнейших исследований.

**Список использованных источников:** 1.Износ алмазов и алмазных кругов/Т.Н.Поладзе, Г.В.Бокучава. – М.: Машиностроение, 1967. – 113 с. 2.Багдасарян К.А. О работоспособности шлифовальных кругов и работе шлифования. - В кн.: Основные вопросы высокопроизводительного шлифования. М.,Машгиз,1960, С.161-170. 3.Богомолов Н.И. Роль прочности абразива и механизм саморегулирования в процессах абразивной обработки /Н.И. Богомолов// Физико-химические явления при шлифовании. Киев: АН УССР, 1976. С.32-40. 4.Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке /Ю.К.Новоселов. – Саратов : Изд-во Саратовского ун-та., 1979. – 232с. 5.Братан С.М. Взаимосвязь перемещений в технологической системе при чистовом и тонком шлифовании / С.М.Братан, Ю.К.Новоселов, Д.Е.Сидоров //Оптимизация производственных процессов: Сб. науч. тр. - Вып.8 - Изд-во СевНТУ Севастополь, 2005 С.79-85. 6.Худобин Л.В. Анализ геометрии абразивного зерна / Л.В.Худобин // Труды Ульяновского политехн. ин-та. – Ульяновск, 1966 – Вып. 1. – С. 19 – 27. 7.Новоселов Ю.К. Износ абразивных зерен в круге при шлифовании заготовок/ Ю.К.Новоселов, В.Б.Богучкий, // «ВЕСТНИК СевНТУ серия «Машиноприладобудування та транспорт » Сб. науч. тр. - Вып.128 - Изд-во СевНТУ Севастополь, 2012.

Поступила в редколлегию 15.06.2012